

전면기초-하부암반 접촉면의 영향분석

Analysis of Mat Foundation by Considering Interface with Rock Mass

이 재 환¹ Lee, Jae-Hwan

조 재 연² Cho, Jae-Yeon

이 성 준³ Lee, Sung-June

정 상 섭⁴ Jeong, Sang-Seom

Abstract

In recent days, the foundations of huge structures in general and mega foundations of grand bridges and high-rise buildings in particular are required in geotechnical engineering. This study described 3 dimensional behavior of mat foundation on soft rock based on a numerical study using 3D finite element method. A series of numerical analyses were performed for various soil conditions and mat rigidities under vertical loading. Based on the results of the parametric study, it is shown that the prediction of the settlement, cross sectional tensile stress and bending moments in the mat is overestimated in the analysis without considering interface behavior in comparison with the analysis considering interface between mat and rock mass.

요 지

최근 국내·외에서 초장대 교량 및 초고층 건물의 시공이 증가하고 있으며, 지반공학적인 측면에서 상부 구조물로 부터 전달되는 큰 하중을 안전하게 지지할 수 있는 대단면 기초의 설계와 시공이 요구되고 있다. 이에 본 연구에서는 연암지반에 실제 시공된 상부 구조물에서 전달되는 수직하중을 받는 전면기초의 거동분석을 위하여 3차원 유한요소 해석을 실시하였다. 해석 시 기초와 지반사이의 접촉면 유·무에 따른 거동을 비교·분석하였으며, 동일한 단면의 기초의 거동을 기초와 지반사이의 상대변위가 연암보다 더 크게 발생할 것으로 예상되는 풍화암 지반조건에서도 분석하였다. 또한 전면기초의 두께를 변화시켜 강성기초와 연성기초의 거동특성을 파악하였다. 본 연구 결과, 접촉면의 거동을 고려하지 않은 해석의 경우 기초의 침하량, 단면에 발생하는 인장응력 및 휨모멘트가 크게 산정되는 것으로 판단되었으며, 그 결과 접촉면의 거동을 고려하지 않을 경우 과다설계에 대한 우려가 있는 것으로 평가하였다.

Keywords : High-rise building, Interface behavior, Mat foundation, Mega foundation

1. 서 론

최근 도시 집중화 현상이 증가하고 있으며 이에 따라 공간 활용도가 높은 초고층 건물의 계획 및 시공이 증

가하고 있다. 건물의 초고층화에 따라 상부구조물에서 지반으로 전달되는 하중이 증가하기 때문에, 이를 안전하게 지지할 수 있는 기초 또한 대형화되고 있는 실정이다. 초고층 건물의 기초 선정은 기초가 시공될 지반

1 연세대학교 토목공학과 박사과정 (Graduate Student, Dept. of Civil Engrg., Yonsei Univ.)

2 연세대학교 토목공학과 박사과정 (Graduate Student, Dept. of Civil Engrg., Yonsei Univ.)

3 정희원, 연세대학교 토목공학과 박사 후 연구원 (Member, Post-Doc., Dept. of Civil Engrg., Yonsei Univ.)

4 정희원, 연세대학교 토목공학과 교수 (Member, Prof., Dept. of Civil Engrg., Yonsei Univ., soj9081@yonsei.ac.kr, 교신저자)

* 본 논문에 대한 토의를 원하는 회원은 2011년 2월 28일까지 그 내용을 학회로 보내주시기 바랍니다. 저자의 검토 내용과 함께 논문집에 게재하여 드립니다.

의 상태에 따라 결정된다. 암반과 같이 지반이 견고한 경우 통상 대단면 전면기초(mat foundation)를 사용하여 하부지반으로 직접 상부하중을 전달 되도록 설계하며 지반이 연약한 경우 대형 깊은 기초를 전면기초에 결합하여 상부하중의 상당부분을 깊은 기초를 통하여 견고한 안정된 하부지반에서 지지하도록 설계한다(김성호 등, 2007). 국내에서 시공된 건축구조물은 풍화대 지반(풍화암, 풍화파쇄대, 풍화토 지반 등) 위에 건설되는 경우가 흔하게 나타났으며, 경제적인 기초 설계방안으로 풍화대지반 지지력을 활용한 전면기초를 주로 사용하였다(최용구 등, 2009). 기존 전면기초의 경우 비용 및 시간을 절약하기 위해서 예비조사 수준의 지반조사를 실시하였으며 이렇게 제한된 지반조사로부터 전체 지반을 대표하는 강도특성을 얻어 설계에 사용하였다.

그러나 초고층 건물의 기초로 사용되고 있는 대단면 전면기초의 경우 기존방법을 통한 대표 지반 강도특성을 사용하기에는 그 신뢰도가 많이 떨어질 뿐만 아니라 이를 이용한 경험식과 보수적인 지지력 공식 등으로 설계를 할 경우 과다설계에 따른 단면 증가 및 공사비 증가와 같은 문제를 야기한다. 따라서 경제적인 대단면 전면기초의 설계를 위하여 전면기초의 거동분석에 대한 수치해석적 연구(Ball 등, 1984; Liou 등, 1996; Rashed, 2005; Bhandari 등, 2009)가 수행되어 왔다. 그러나 기존 연구는 지반과 기초가 완벽히 일체거동을 한다는 가정을 하였다. 그러므로 강성이 다른 두 재료(즉, 기초-지반) 사이에 발생하는 마찰력을 고려하지 않기 때문에 접

촉면에서의 접촉(contact) 혹은 항복(slip)거동을 적절히 반영하지 못하고 있어 전면기초의 실제와 유사한 거동을 묘사하는데 한계가 있다(그림 1 참조).

이에 본 연구에서는 연암지반에 실제 시공된 상부 구조물에서 전달되는 수직하중을 받는 전면기초의 거동 분석을 위하여 기초와 지반사이의 마찰력을 고려한 3차원 유한요소 해석을 실시하였다. 해석 시 기초와 지반사이의 접촉면 유·무에 따른 거동을 비교·분석하였으며, 동일한 단면의 기초의 거동을 기초와 지반사이의 상대변위가 연암보다 더 크게 발생할 것으로 예상되는 풍화암 지반조건에서도 분석하였다. 또한 전면기초의 두께를 변화시켜 강성기초와 연성기초의 거동특성을 파악하였다.

2. 해석 대상 및 지반조사 결과

전면기초와 지반사이의 접촉면의 영향을 분석하기 위하여 실제 초고층 주상복합 건축물의 하부기초로 시공된 전면기초의 일부 구간을 대상으로 지반조사 결과 분석 및 수치해석을 수행하였다. 그림 2는 해석 대상구간의 평면도 및 기초형식을 나타내었다. 해석 대상 구조물의 하부기초는 두께 2.5m의 대단면 전면기초로 시공되었다. 그림 2에서 나타난 바와 같이 기초판은 연암에 지지되어 있으며, 지표면을 기준으로 지하 12m에 위치하고 있다.

지반조사 보고서를 바탕으로 해석구간과 가장 근접

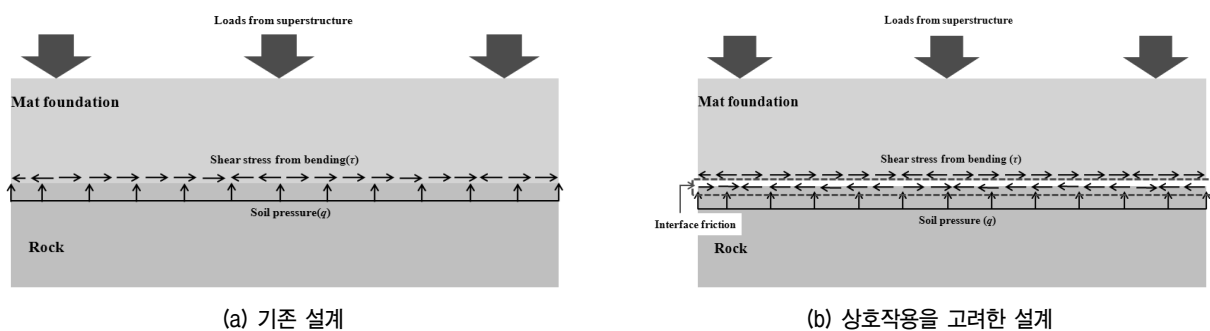
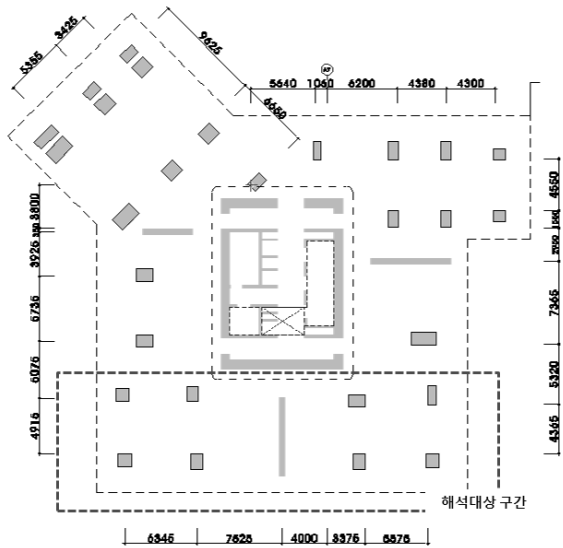


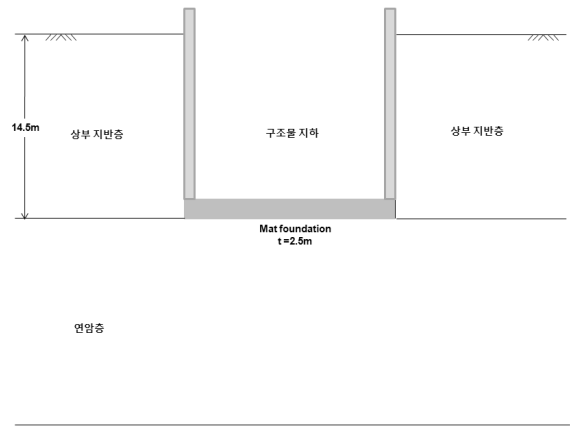
그림 1. 접촉면에서의 거동 차이

표 1. 해석대상 구간의 시추조사 결과

지층구분	구성성분	심도(m)	두께(m)	N치(회/cm)	비고
매립층	실트질 모래	0.0 ~ 2.1	2.1	/30 ~ 7/30	SPT
퇴적토층	점토	2.1 ~ 5.5	3.4	9/30 ~ 22/30	SPT
풍화토층	실트 및 모래형태	5.5 ~ 6.1	0.6	50/19	SPT
연암층	흑색 셰일	6.1 ~ 30.0	23.9	-	-



(a) 해석대상 구간 평면도



(b) 해석대상 구간 기초형식

그림 2. 해석 대상구간의 평면도 및 기초형식

한 시추공의 지층구성 및 지반조건을 사용하여 해석을 수행하였으며, 표 1에 정리하였다. 해석대상지반은 매립층이 2.1m정도 분포하고 있으며, 그 하부에 퇴적토층과 풍화토, 연암 순으로 분포하고 있다.

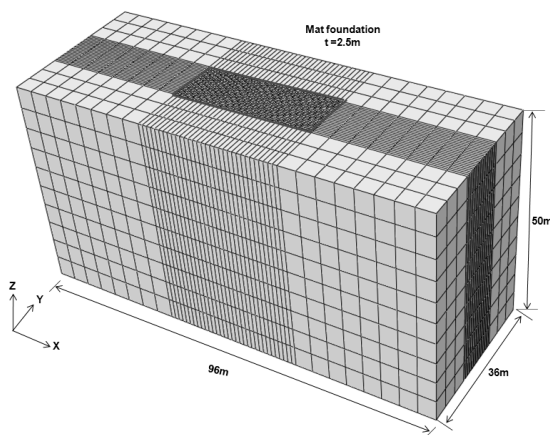
의 경우도 고려하였고, 기초의 두께를 변화시켜 강성 및 연성기초의 거동을 분석하였다. 유한요소 해석은 범용 프로그램인 ABAQUS(ver 6.5)를 이용하였다(ABAQUS, 2004).

3. 3차원 유한요소 해석

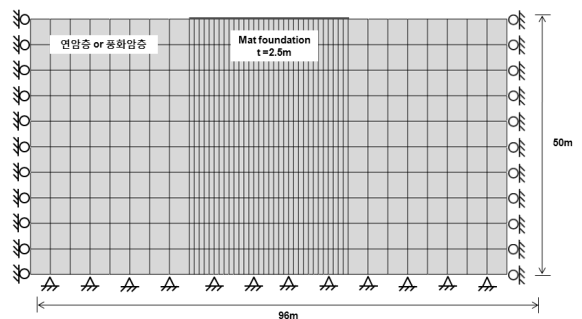
3.1 해석 메쉬와 경계조건

본 논문에서는 OO주상복합구조물의 하부 전면기초에 대한 접촉면의 영향에 따른 거동분석을 위하여 일련의 3차원 유한요소 해석을 수행하였으며, 실제 현장조건인 연암지반의 경우와 상대적으로 기초와 지반사이의 상대변위가 크게 발생할 것으로 예상되는 풍화암 지반

본 연구에서 사용된 대표적인 단면으로는 지반조건이 균질한 직육면체(96m×36m×50m)의 3차원 메쉬를 사용하였으며, 대단면 전면기초의 연성도(flexibility)를 고려하여 쉘요소(shell element)를 사용하여 모델링 하였다(그림 3(a) 참조). 표 2는 본 연구에서 수행한 해석 종류



(a) 해석에 사용된 메쉬



(b) 경계조건

그림 3. 해석에 사용된 mesh 및 경계조건

표 2. 해석종류

구분	풍화암	연암	비고
접촉면 유·무	2 case	2 case	실제 기초 두께 (2.5m)
강성도	-	2 case	기초 두께 (1m 혹은 5m)

이다. 또한 전면기초-지반 접촉면에서는 Jeong 등(2004)이 적용한 접촉요소인 slip모형을 사용하여 기초와 지반 사이의 항복(slip)을 모델링 하였으며, 지하수위는 고려하지 않았다.

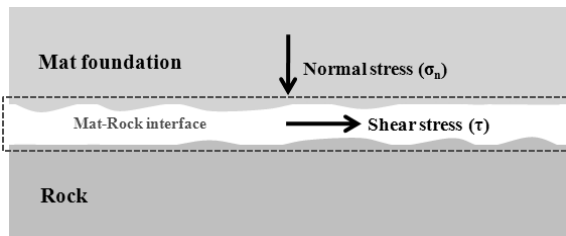
해석모델 경계 바닥면은 핀으로 고정하였으며, 수직 경계면은 모두 롤러를 사용하여 수직방향의 변위만 허용하도록 하였다(그림 3(b) 참조). 또한 초기 지반 응력 상태를 반영하기 위해 상부하중재하 전에 중력을 가하여 지반의 초기응력상태를 구현하였다.

3.2 지반 물성 및 구성 모델

본 해석 시 지반은 Mohr-Coulomb의 구성 법칙을 따르는 탄소성 재료로 가정하였고 전면기초는 탄성모델

표 3. 해석에 사용된 지반과 기초의 물성

구분	Mat	풍화암	연암
γ_t (kN/m ³)	24.0	20.0	23.0
E (kPa)	28,000,000	1,000,000	2,505,604
c (kPa)	-	5,000	10,000
ϕ (deg.)	-	31.3	38.2
ν	0.15	0.3	0.27
모델	elastic	Mohr-Coulomb	Mohr-Coulomb



(a) 전면기초-지반의 접촉면

을 적용하였다. 사용된 물성치는 표 3에 정리하였다. 전면기초-지반 접촉면의 거동은 ABAQUS 내부 모델 중 slip 요소를 이용하여 묘사하였으며, 기초저면과 지반과의 상대변위가 발생할 경우 전단응력(τ)이 발생하도록 하였다.

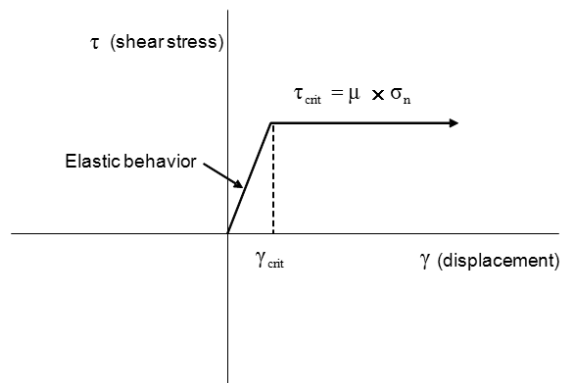
접촉면에서의 거동모사는 그림 4에 나타난 바와 같으며, 암반은 양호한 지반이기 때문에 변위가 탄성영역에서 발생할 것으로 판단하였고, 따라서 최대 마찰력이 발생하기 위한 한계 상대변위 값을 2mm로 적용하였다. 접촉면에서의 거동에 영향을 주는 마찰계수(μ , interface friction coefficient)는 식 (1)로부터 산정된다(Jeong 등, 2004). 여기서 β 는 유효응력법 계수로서, 지반의 종류에 따라 달라진다(Zeevaert, 1959). 기초-지반 경계면은 충분히 거칠다고 가정하여 접촉면의 마찰각(δ)은 지반의 내부마찰각(ϕ)과 같다고 가정하였다. 따라서 경계면의 마찰각은 연암과 풍화암의 내부마찰각에 따라 산정하였다. 지반-기초 경계면에서 최대 상대변위가 발생하는 경우, $\tau = \mu \times \sigma'_n$ 로 정의되는 최대마찰 응력이 발생한다. 여기서 σ'_n 는 전면기초에 작용하는 유효 수직응력으로써 본 해석의 하중조건을 반영하였다.

$$\mu = \tan(\delta) = \frac{\beta}{K_0} \quad (1)$$

여기서, K_0 는 정지토압계수, δ 는 접촉면의 마찰각이다.

3.3 하중 조건

수치해석에 사용된 상부 구조물에 의한 하중의 크기



$$\text{No sliding: } \tau < \mu \times p' \quad \text{Sliding: } \tau = \mu \times p'$$

(b) 접촉면에서의 거동

그림 4. 전면기초-지반 접촉면 slip 모델

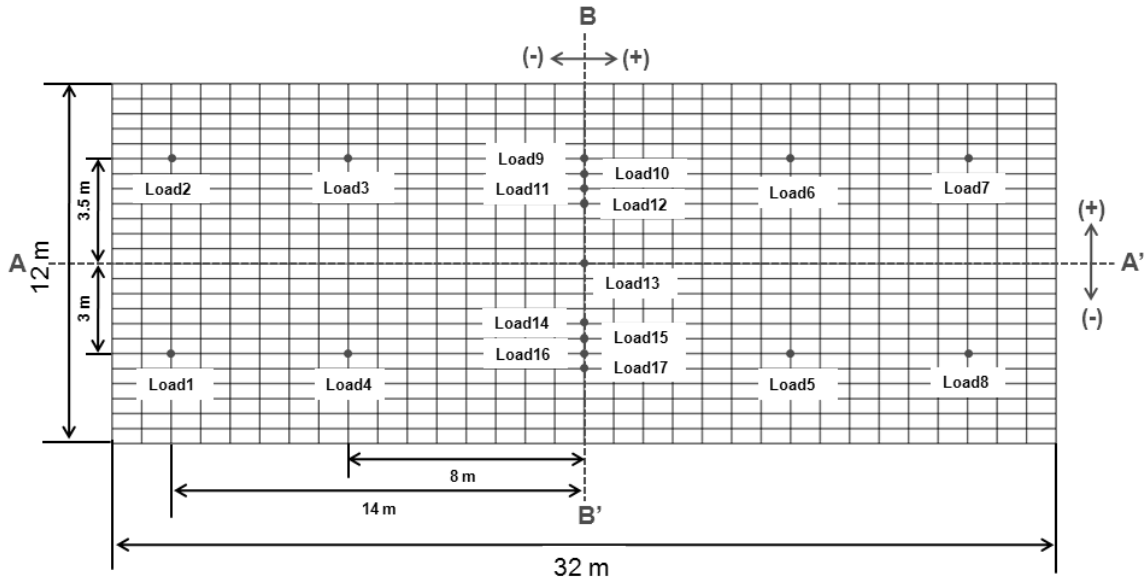


그림 5. 전면기초의 메쉬 및 하중작용 위치

표 4. 입력 하중

구분	하중크기(kN)
Load1	19,204
Load2	16,911
Load3	17,904
Load4	22,802
Load5	22,547
Load6	17,942
Load7	19,746
Load8	19,459
Load9	2,642
Load10	4,827
Load11	4,327
Load12	7,168
Load13	9,934
Load14	4,873
Load15	6,070
Load16	3,872
Load17	7,637

와 위치는 대상 전면기초에 작용하는 실제 설계하중 및 도면을 기초로 하였다. 그림 5에서는 하중작용위치를 표시하였으며, 하중의 크기와 좌표는 표 4에 정리하였다. 좌표는 전면기초의 중심을 원점으로 하여 이보다 상향 또는 우측방향을 양의 값을 가지는 좌표로 하였으며, 하향 및 좌측방향은 음의 값으로 정하였다.

대상 전면기초 주위 지반에 가해지는 유효상재하중은 기초하부에서 지표면까지의 각 지층별 두께와 유효단위 중량을 고려하여 산정하였으며, 전면기초 주위 지반에

등분포하중으로 상부에 작용하였다. 또한 하중을 작용하기에 앞서 전면기초의 자중을 고려하기 위해 ABAQUS의 GEOSTATIC STEP을 이용하여 대상 전면기초에 중력을 작용하였으며, 초기 지반 응력상태(k_0 condition)를 구현하였다.

4. 해석 결과

본 연구에서는 연암과 풍화암으로 지반조건을 달리 하여 기초-지반 접촉면의 고려여부에 따른 전면기초의 거동을 분석하였다. 또한 추가적인 수치해석을 통해 전면기초의 두께에 따른 강성 및 연성조건에 따른 전면기초 거동을 비교·분석하였다.

4.1 전면기초의 침하량 분석

기둥 및 벽체를 통하여 상부구조물에서 전달되는 하중을 고려한 전면기초의 침하량을 접촉면의 고려여부에 따른 영향 및 지반조건에 따라 비교 분석하였다. 그림 6(a)와 (b)는 풍화암 지반, 그림 6(c)와 (d)는 현장조건과 동일한 연암지반에서의 기초의 침하량을 대표단면인 A-A', B-B' 단면에서 나타내었다. 풍화암보다 지반조건이 좋은 연암의 경우 전체적인 기초의 침하량이 감소하였고 접촉면(interface)의 유·무에 따른 침하량을 비교했을 경우 두 지반조건에서 전부 접촉면의 영향을 고려하지 않은 해석에서 더 큰 침하량 분포를 보이는

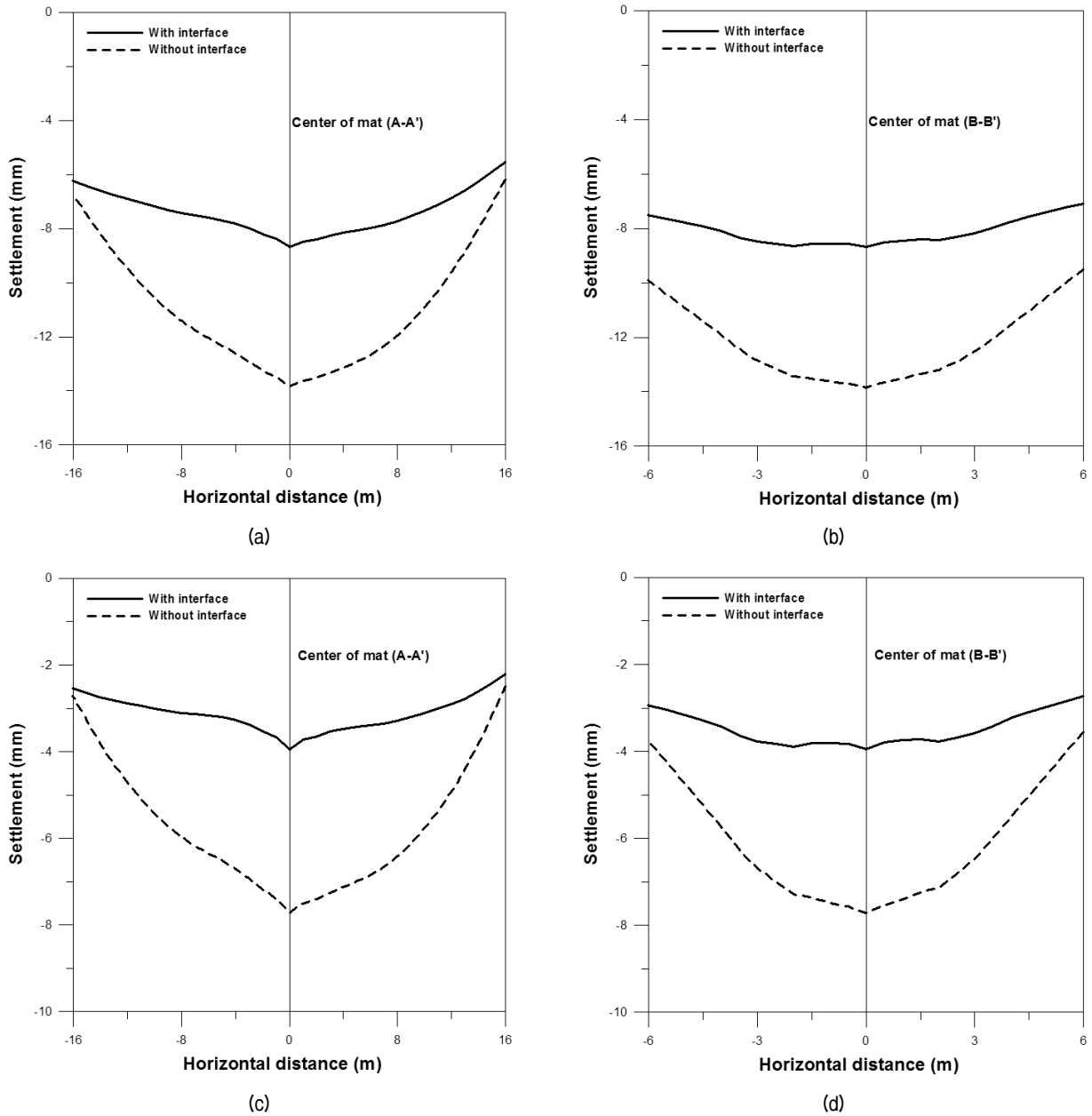


그림 6. 전면기초의 침하량 (a) 풍화암지반, A-A' 단면 (b) 풍화암지반, B-B' 단면 (c) 연암지반, A-A' 단면 (d) 연암지반, B-B' 단면

것으로 나타났으며 부등침하량 또한 크게 산정되었다.

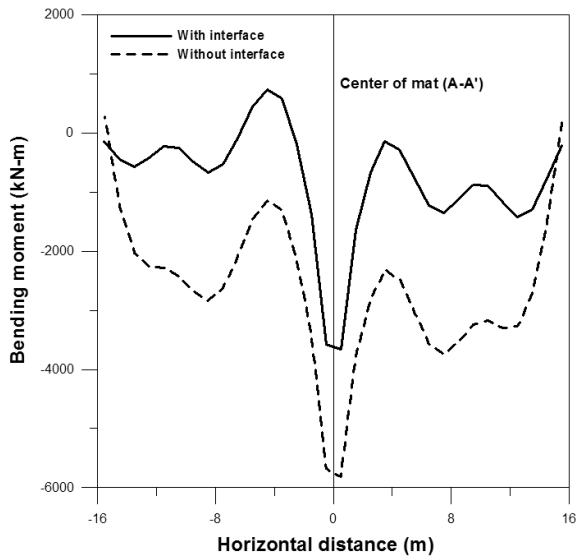
이는 기초-지반 접촉면의 영향을 고려하였을 경우 기초와 지반 사이에 발생하는 상대변위에 따른 접촉면에서의 마찰력이 전면기초의 휨에 의해 발생하는 기초저면에서의 인장력에 저항함으로써 기초의 휨을 저감시킨다. 따라서 기초의 전체 침하량과 부등침하를 감소시키는 것으로 판단된다.

4.2 기초에 작용하는 인장응력 및 휨 모멘트

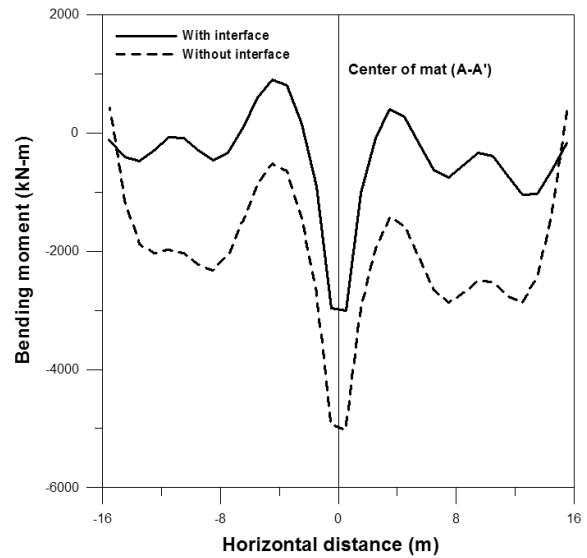
그림 7은 풍화암과 연암에 설치된 전면기초에서 발생

하는 휨모멘트를 대표단면인 A-A' 단면에서 기초-접촉면의 고려여부에 따라 나타내고 있다. 풍화암에 설치된 전면기초에 비해 상대적으로 부등침하량이 작고(그림 6 참조), 지반 강성이 큰 연암에 설치된 전면기초에서 상대적으로 작은 휨모멘트가 발생하였다. 기초-지반 접촉면을 고려한 해석결과와 경우 상부구조물의 하중에 따른 기초의 휨을 접촉면에서 마찰력이 저감시킴으로써 기초단면에 발생하는 휨모멘트를 감소시키는 것으로 나타났다.

따라서, 상대적으로 부등침하량이 작게 산정되어 기초단면에 작은 휨모멘트가 발생하는 경우(즉, 지반의 강성이 큰 경우와 기초-지반 접촉면을 고려한 경우), 휨에 따

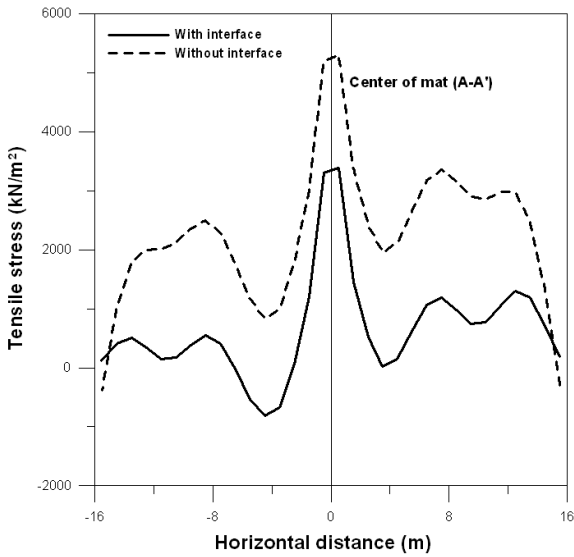


(a) 풍화암 지반

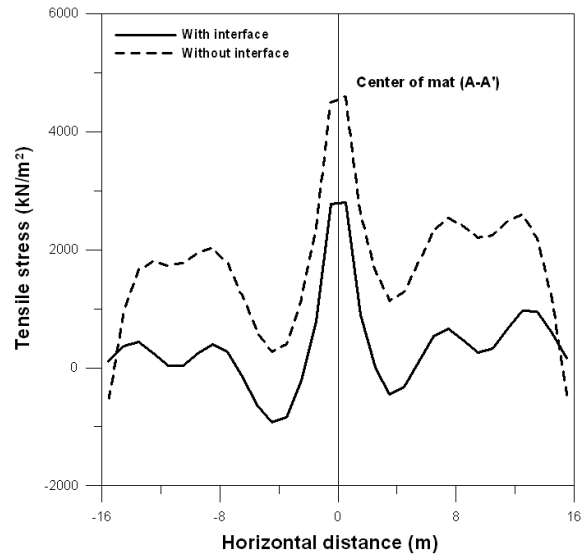


(b) 연암 지반

그림 7. A-A' 단면에서의 휨모멘트 분포 (a) 풍화암 지반 (b) 연암 지반



(a) 풍화암 지반



(b) 연암 지반

그림 8. A-A' 단면에서 발생한 인장응력 (a) 풍화암 지반 (b) 연암 지반

른 최대인장응력이 발생하는 기초하부 단면에서의 인장 응력 또한 작게 산정되는 것으로 나타났다(그림 8 참조). 위의 해석결과로부터 대단면 기초설계 시 기초-지반 접촉면의 마찰력을 고려함으로써 기초단면의 두께를 저감시킬 수 있고 또한 인장 철근량을 줄임으로 인해 기존 설계보다 더 경제적인 설계가 가능할 것으로 판단된다.

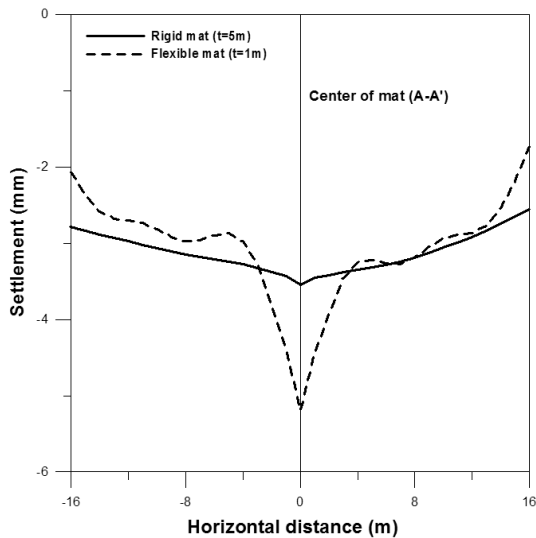
4.3 기초의 강성에 따른 거동 분석

ACI Committee 336(1988)에 의하면 강성계수(K_r , rigidity factor)를 정의하고 이에 따라 K_r 값이 0.5 이상일 경우

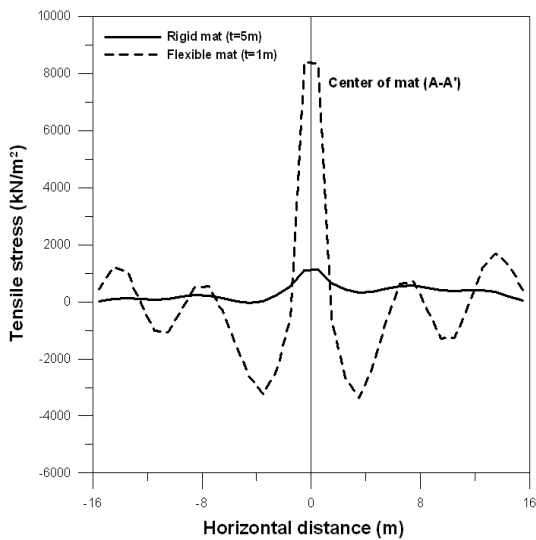
표 5. 강성 계수(ACI Committee 336)

강성계수	예상 부등침하량
0	$0.5 \times$ 총 침하량(긴 기초($B/L=0$))
	$0.35 \times$ 총 침하량(정방 기초($B/L=1$))
0.5	$0.1 \times$ 총 침하량
> 0.5	0(강성기초 : 부등침하량 없음)

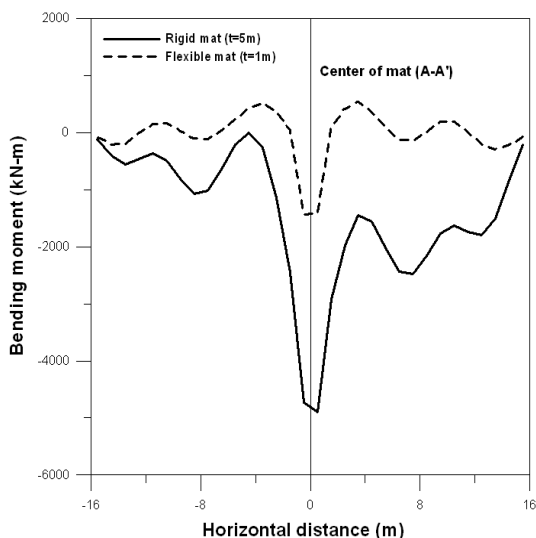
전면기초를 강성기초로 가정하여 부등침하가 발생하지 않는다고 판단하고 있다(표 5 참조). 본 연구에서는 연성도(flexibility)를 고려한 대단면 전면기초를 대상으로 하였다. 따라서 보-기둥이론(Beam-Column theory)을 적



(a) 전면기초의 침하량(A-A')



(b) 인장응력 분포(A-A')



(c) 휨모멘트 분포(A-A')

그림 9. A-A' 단면에서의 강성 및 연성기초의 거동

용하여 도출된 강성계수 K_r 을 대단면 전면기초에 직접적으로 사용할 수는 없지만 수치해석 대상 기초의 대략적인 강성도를 수치적으로 나타내는데 사용하였다. 강성계수 K_r 은 식 (2)에 의하여 산정하며 본 연구에서는 지반의 탄성계수(E_s) 및 기초의 탄성계수(E)와 단면을 일정하게 유지하고 기초의 두께를 1m와 5m로 가정하여, 강성계수 0.01(연성기초), 2.15(강성기초)의 두 가지 조건에서 전면기초의 거동을 비교·분석하였다.

$$K_r = \frac{EI_b}{E_s B^3} \quad (2)$$

여기서, E_s 는 지반의 탄성계수, E 는 전면기초의 탄성계수, B 는 산정단면과 수직인 면의 기초두께, I_b 는 기초의 단면 2차 모멘트이다.

그림 9는 강성 및 연성기초의 A-A' 대표단면에서의 침하량과 인장응력 및 모멘트를 비교한 그림이다. 두 조건 모두 지반과 기초의 접촉면의 영향을 고려하였으며, 하중 및 지반조건을 동일하다. 강성기초의 경우 연성기초에 비해 상대적으로 전체침하량과 부등침하량 모두 작게 발생하였다. 단면 최하단부에서 산정된 인장응력의 경우 강성기초 조건에서는 전형적인 힘을 받는 전면기초의 거동을 보여주고 있지만 설계단면보다 더 얇은 두께를 가지는 연성기초의 경우 단면 최하부에서 압축응력과 인장응력이 큰 차이를 보인다. 따라서 단면에 전단력이 많이 발생하는 것으로 나타났으며, 기초가 휨에 저항하지 못함으로써 연성기초에서 작은 모멘트가 나타나는 것으로 판단된다.

5. 결론

본 연구에서는 연암 및 풍화암 지반에 시공된 전면기초의 거동을 접촉면(interface)의 영향에 따른 기초의 침하량, 단면에 발생하는 인장응력 및 휨 모멘트를 통하여 분석하였다. 또한 기초의 강성에 따른 거동차이를 비교·분석하였다. 본 연구를 통하여 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

- (1) 기초-지반의 접촉면의 거동을 반영하여 전면기초를 해석한 결과 접촉면의 거동을 반영하지 않은 경우보다 침하량 및 부등침하량이 작게 산정되었으며, 이 경향은 풍화암 및 연암지반 조건 모두 동일하게 나타났다. 이는 기초-지반 접촉면의 영향을 고려하

였을 경우 기초와 지반 사이에 발생하는 상대변위에 따른 접촉면에서의 마찰력이 휨에 의해 발생하는 기초저면에서의 인장력에 저항함으로써 발생 휨모멘트를 감소시키고 전체침하량과 부등침하량 또한 감소시키는 것으로 판단된다.

- (2) 또한, 기초 단면에서의 발생 응력 및 휨모멘트의 분포를 비교하였을 때 접촉면의 거동을 고려하지 않은 경우 기초하부 단면에서의 인장응력 및 모멘트를 크게 산정하는 것으로 나타났다. 이는 접촉면의 거동을 고려한 경우 상부구조물의 하중에 따른 기초의 휨을 접촉면에서 마찰력이 저감시킴으로써 기초단면에 발생하는 휨모멘트를 감소시키는 것으로 보이며 휨에 따른 발생 인장응력 또한 감소하는 것으로 판단된다.
- (3) 강성기초는 침하량이 연성기초보다 일정한 분포를 보였으며 연성기초는 상대적으로 부등침하가 크게 발생하였다. 또한 인장응력의 경우, 강성기초 조건에서는 전형적인 휨을 받는 전면기초의 거동을 보여주고 있지만 연성기초는 단면에 전단력이 많이 발생하는 것으로 나타났으며, 기초가 휨에 저항하지 못함으로써 연성기초에서 작은 모멘트가 발생하는 것으로 판단된다.
- (4) 접촉면에서의 거동을 반영하지 않고 구조물의 해석을 수행할 경우 발생 침하량, 단면 발생 인장응력 및 휨모멘트가 상대적으로 크게 산정되는 경향을 알 수 있었으며, 이는 기초의 과다설계로 이어질 수 있고, 시공에 필요한 재료의 증가를 초래할 수 있다.

감사의 글

본 연구는 국토해양부가 주관하고 한국건설교통기술평가원이 시행하는 2009년도첨단도시개발사업(과제번호:09CHUD-A052272-01)에 의해 수행되었습니다.

참 고 문 헌

1. 김성호, 최용규 (2007), “초고층 건축물의 대형기초 설계 및 말뚝 재하시험 사례 연구”, *한국지반공학회 기초기술 및 ATC-18 설립 기념 세미나 논문집*, pp.3-36.
2. 최용규, 김성호, 이민희 (2009), “풍화대지반에 지지된 건축구조물의 전면기초 적용에 관한 사례연구”, *한국지반환경공학회 논문집*, 제 10권, 6호, pp.5-18.
3. ABAQUS version 6.5 (2004), Hibbit, Karlsson & Sorensen, Pawtucket R.I.
4. ACI Committee 336 (1988), *Suggested design procedures for combined footings and mats*, American Concrete Institute.
5. Ball, S. C. and Notch, J. S. (1984), “Computer analysis/design of large mat foundations”, *Journal of Structural Engineering*, ASCE, Vol.110, No.5, pp.1180-1196.
6. Bhandari, A. and Han, J. (2009), “DEM study of a shallow foundation under vertical loading”, *International foundation congress and equipment expo*, Orlando, Florida, pp.465-472.
7. Jeong, S. S., Lee, J. H. and Lee, C. J. (2004), “Slip effect at the pile-soil interface on dragload”, *Computers & Geotechnics*, Vol.31, pp.115-126.
8. Liou, G. S. and Lai, S. C. (1996), “Structural analysis model for mat foundations”, *Journal of Structural Engineering*, ASCE, Vol.122, No.9, pp.1114-1117.
9. Rashed, Y. F. (2005), “A boundary/domain element method for analysis of building raft foundations”, *Engineering analysis with boundary elements*, Vol.29, pp.859-877.
10. Zeevaert, L. (1959), *Reduction of Point Bearing Capacity of Piles Because of Negative Skin Friction*.

(접수일자 2010. 4. 15. 심사완료일 2010. 8. 24)